饲粮添加苹果果胶寡糖对断奶大鼠生长性能、抗氧化能力和肠道健康的影响#

毛湘冰[1] 冯小花[2] 陈代文[1] 余 冰[1] 石 波[3] 陈 浩[1] 何 军[1] 虞 洁[1] 罗钧秋[1]

（1.四川农业大学动物营养研究所，动物抗病营养教育部重点实验室，成都 611130；2.湖南省畜牧兽医研究所，长沙 410131；3.中国农业科学院饲料研究所，北京 100081）

摘 要：本研究旨在探讨饲粮添加苹果果胶寡糖（apple pectic oligosaccharide,APOS）对断奶大鼠生长性能、抗氧化能力和肠道健康的影响。试验选取 24 只健康的断奶 Wistar 大鼠，按照体重相近的原则分为 2 个处理，分别饲喂基础饲粮和添加 800 mg/kg APOS 的饲粮，试验期为 14 d。结果表明：饲粮添加 APOS 显著提高了断奶大鼠平均日增重和平均日采食量（P<0.05），显著降低了料重比（P<0.05）；饲粮添加 APOS 可显著提高断奶大鼠血清总抗氧化能力（P<0.05），降低血清中丙二醛的含量（P<0.05）；饲粮添加 APOS 还可显著提高空肠黏膜绒毛高度/隐窝深度值（P<0.05）；此外，饲粮添加 APOS 也提高了盲肠食糜中乳酸菌和双歧杆菌的数量（P<0.05），降低了盲肠食糜中大肠杆菌的数量（P<0.05）。综上所述，在断奶大鼠的饲粮中添加 APOS 可以提高其生长性能，而这可能源于其改善了大鼠抗氧化能力、空肠黏膜形态和肠道菌群结构。

关键词：苹果果胶寡糖；断奶大鼠；生长性能；抗氧化能力；肠道健康

中国分类号：S816.7 文献标识码： 文章编号：

寡糖是由 2~10 个单糖分子以糖苷键相连形成的直链或支链糖类化合物，在生物体生命活动中具有重要的功能。根据寡糖的生物学功能，可将其分为普通寡糖和功能性寡糖。普通寡糖中有人们熟悉的蔗糖、麦芽糖、乳糖等，它们可以被机体消化吸收，又称营养性寡糖。功能性寡糖其本身不能被机体胃酸、消化酶降解吸收，但适宜剂量功能性寡糖的使用可调节多种生理功能，如调节体内糖脂代谢、增强机体免疫功能、促进矿物元素吸收、改善消化道菌群结构、抗氧化以及抗肿瘤等，进而起到促进生长和维持健康的作用[1-5]。

作为一种功能性寡糖，果胶寡糖主要是通过果胶酶酶解植物果实、根、茎和叶中的天然果胶制成，主要成分是半乳糖醛酸及其与其他单糖形成的果胶二糖和果胶三糖[6]。近年来针对其营养性功能的研究表明，不同来源（如山楂、柑橘）果胶寡糖具有调节机体脂肪代谢，提高细胞和机体抗氧化能力，改善肠道微生态环境的作用[7-9]。本文所在研究小组的前期预试验发现，饲粮添加不同水平（200~1 600 mg/kg）苹果果胶寡糖（apple pectic

---

收稿日期：2016-03-14

基金项目：十二五国家科技支撑计划（2011BAD26B02）；四川省科技支撑项目（2013NZ0056）；现代农业产业技术体系（CARS-36）

作者简介：毛湘冰（1980—），男，湖南长沙人，副教授，博士，主要从事动物营养与饲料科学研究。E-mail：acatmxb2003@163.com

oligosaccharide,APOS）可不同程度提高断奶大鼠的生长性能，且以 800 mg/kg 添加水平效果最佳（数据未发表）。而果胶寡糖是否可调节肠道黏膜形态尚未见报道，且 APOS 是否与其他来源的果胶寡糖具有类似的功能也有待于进一步研究。因此，本研究的目的在于探讨饲粮中添加 APOS 对断奶大鼠的抗氧化能力、空肠黏膜形态和盲肠菌群结构的影响，以期为在生产中或临床上应用果胶寡糖改善仔猪或幼儿健康状况提供试验支撑。

1　材料与方法

1.1　试验材料

APOS：由中国农业科学院饲料研究所提供，产品中果胶寡糖的含量为 30%以上（主要是果胶二糖、果胶三糖和半乳糖醛酸单糖），其他成分为辅料——玉米淀粉。

1.2　试验动物与试验设计

试验选取 24 只平均体重约为 46.80 g 的健康 21 日龄断奶 Wistar 大鼠（成都达硕实验动物有限公司提供），按照体重相近的原则随机分为 2 个处理，每个处理 12 个重复，每个重复 1 只大鼠，分别饲喂基础饲粮和试验饲粮（基础饲粮中添加 800 mg/kg APOS），试验期为 14 d。试验于四川农业大学动物营养研究所教学科研基地完成，试验大鼠采用单笼饲养，常规饲养管理，自然采光、通风，自由采食、饮水。

试验大鼠基础饲粮采用 AIN-93G 大鼠纯化饲粮标准，交由成都达硕实验动物有限公司配制，基础饲粮组成及营养水平见表 1。试验饲粮是以 800 mg/kg APOS 等量替代基础饲粮中玉米淀粉配制而成。

表 1　基础饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1　Composition and nutrient levels of the basal diet (air-dry basis)　　%

项目 Items	含量 Content
原料 Ingredients	
玉米淀粉 Corn starch	39.748 6
酪蛋白（蛋白质>85%） Casein （protein >85%）	20.000 0
玉米淀粉糊精 Dextrinized cornstarch	13.200 0
蔗糖 Sucrose	10.000 0
大豆油（无添加剂） Soybean oil （no additives）	7.000 0
纤维素 Fiber	5.000 0
矿物元素混合物 Mineral mixture[1)]	3.500 0

维生素混合物 Vitamin mixture[2)]	1.000 0
L-胱氨酸 *L*-Cys	0.300 0
重酒石酸胆碱（41.1%胆碱） Choline bitartrate （41.1% choline）	0.250 0
特丁基对苯二酚 Tert-butylhydroquinone	0.001 4
合计 Total	100.000 0
营养水平 Nutrient levels[3)]	
代谢能 Metabolizable energy/（MJ/kg）	16.62
粗蛋白质 Crude protein	18.70
纤维素 Fiber	5.00
脂肪 Fat	7.00
碳水化合物 Carbohydrate	64.70

[1)] 矿物元素混合物成分 Mineral mixture ingredients（g/kg）：碳酸钙 calcium carbonate 357.000 00，磷酸二氢钾 monopotassium phosphate 196.000 00，一水柠檬酸钾 potassium citrate monohydrate 70.780 00，氯化钠 sodium chloride 74.000 00，硫酸钾 potassium sulfate 46.600 00，氧化镁 magnesium oxide 24.000 00，柠檬酸铁 ferric citrate 6.060 00，碳酸锌 zinc carbonate 1.650 00，碳酸锰 manganese carbonate 0.630 00，碳酸铜 copper carbonate 0.300 00，碘酸钾 potassium iodate 0.010 00，无水硒酸钠 sodium selenite anhydrous 0.010 25，四水钼酸铵 ammonium paramolybdate 4 hydrate 0.007 95，九水偏硅酸钠 sodium metasilicate 9 hydrate 1.450 00，十二水硫酸铬钾 chromium potassium sulfate 12 hydrate 0.275 00，氯化锂 lithium chloride 0.017 40，硼酸 boric acid 0.081 50，氟化钠 sodium fluoride 0.063 50，碳酸镍 nickel carbonate 0.031 80，钒酸铵 ammonium vanadate 0.006 60，蔗糖粉 powdered sucrose 221.026 00。

[2)] 维生素混合物成分 Vitamin mixture ingredients（g/kg）：*D*–泛酸钙 *D*-calcium pantothenate 1.600，维生素 B_6 盐酸盐 pyridoxine HCl 0.700，烟酸 nicotinic acid 3.000，维生素 B_1 盐酸盐 thiamine HCl 0.600，VB_2 0.600，叶酸 folic acid 0.200，*D*–生物素 *D*-biotin 0.020，VB_{12} 2.500，VE（500 IU/g） 15.000，VA（500 000 IU/g） 0.800，VD_3（400 000 IU/g） 0.250，VK 0.075，蔗糖粉 powdered sucrose 974.655。

[3)]营养水平为计算值。Nutrient levels were calculated values.

1.3 测定指标及方法

1.3.1　生长性能

以重复为单位，与试验第 1 和 15 天对所有的大鼠进行空腹称重，并记录每日采食量，用于计算大鼠的平均日采食量（ADFI）、平均日增重（ADG）和料重比（F/G）。

1.3.2　样品采集

试验第 15 天称重后，对所有大鼠进行眼球摘除采血于离心管中，低温下静置 30 min，3 000 r/min 离心 15 min 制备血清，于－20 ℃保存备用。采血后，对大鼠采用脊椎脱臼法处死，迅速分离大鼠肠段，取 3 cm 空肠肠段于 10%中性福尔马林液中固定；并取盲肠食糜，于－80 ℃保存。

1.3.3　血清抗氧化能力

大鼠血清中丙二醛（malondialdehyde,MDA）含量和总抗氧化能力（total antioxidant capacity,T-AOC）采用南京建成生物工程研究所生产的试剂盒测定，所有的操作均按照说明书进行。

1.3.4　空肠黏膜形态

大鼠空肠黏膜形态（绒毛高度、隐窝深度和绒毛高度/隐窝深度）的测定参考 Mao 等[10]的方法进行。

1.3.5　盲肠食糜中菌群数量

采用实时荧光定量 PCR 技术测定大鼠盲肠食糜中菌群（总菌、乳酸菌、双歧杆菌和大肠杆菌）的数量，具体方法参考 Mao 等[11]进行。

1.4　数据处理与分析

试验数据采用 Excel 2003 进行初步整理，所有测定结果以每只大鼠为统计单位，采用 SAS 8.1 软件进行 t 检验，以 P<0.05 为差异显著判断标准。数据以“平均值±标准误”表示。

2 结　果

2.1　饲粮添加 APOS 对断奶大鼠生长性能的影响

从表 2 中可以看出，饲粮添加 APOS 显著改善了断奶大鼠的生长性能（P<0.05）。其中，与饲喂基础饲粮的对照组大鼠相比，饲喂添加 APOS 饲粮大鼠的 ADFI 和 ADG 分别提高了 15.41%和 51.16%（P<0.05），而 F/G 降低了 24.05%（P<0.05）。

表 2　饲粮添加 APOS 对断奶大鼠生长性能的影响

Table 2　The effect of dietary APOS supplementation on the growth performance of weaned rats (n=12)

项目 Items	对照组 Control group	APOS 组 APOS group
初始体重 The initial body weight/g	46.80±1.08	46.79±1.07
平均日采食量 ADFI/g	6.49±0.21^{b}	7.49±0.24^{a}
平均日增重 ADG/g	0.86±0.04^{b}	1.30±0.02^{a}
料重比 F/G	7.61±0.21^{a}	5.78±0.20^{b}

同行数据肩标不同字母表示差异显著（*P*<0.05）。下表同。

In the same row, values with different letter superscripts mean significant difference (*P*<0.05). The same as below.

2.2　饲粮添加 APOS 对断奶大鼠血清抗氧化能力的影响

从表 3 中可以看出，饲粮添加 APOS 可显著改善断奶大鼠的抗氧化能力（*P*<0.05）。与饲喂基础饲粮的对照组大鼠相比，饲喂添加 APOS 饲粮大鼠的血清 T-AOC 提高了 99.46%（*P*<0.05），而血清 MDA 的含量降低了 14.69%（*P*<0.05）。

表 3　饲粮添加 APOS 对断奶大鼠血清抗氧化能力的影响

Table 3　The effect of dietary APOS supplementation on the serum antioxidant capacity of weaned rats (*n*=12)

项目 Items	对照组 Control group	APOS 组 APOS group
总抗氧化能力 T-AOC/(U/mL)	1.85±0.27^{b}	3.69±0.48^{a}
丙二醛 MDA/(nmol/mL)	4.63±0.18^{a}	3.95±0.13^{b}

2.3　饲粮添加 APOS 对断奶大鼠空肠黏膜形态的影响

从表 4 中可以看出，饲粮添加 APOS 对断奶大鼠的空肠黏膜绒毛高度和隐窝深度无显著影响（*P*>0.05），但显著提高了断奶大鼠空肠黏膜的绒毛高度/隐窝深度值（*P*<0.05）。

表 4　饲粮添加 APOS 对断奶大鼠空肠黏膜形态的影响

Table 4　The effect of dietary APOS supplementation on the jejunum mucosal morphology of weaned rats (*n*=12)

项目 Items	对照组 Control group	APOS 组 APOS group
绒毛高度 Villus height/μm	163.31±10.47	178.90±8.87
隐窝深度 Crypt depth/μm	52.32±2.68	49.37±3.29
绒毛高度/隐窝深度 Villus height/crypt depth	3.19±0.10^{b}	3.70±0.14^{a}

2.4 饲粮添加 APOS 对断奶大鼠盲肠食糜中菌群结构的影响

从表 5 中可以看出，饲粮添加 APOS 可显著影响断奶大鼠盲肠食糜中菌群（P<0.05）。与饲喂基础饲粮的对照组大鼠相比，饲喂添加 APOS 饲粮大鼠盲肠食糜中乳酸菌和双歧杆菌的数量显著提高（P<0.05），且大肠杆菌数量显著降低（P<0.05），但是，总菌的数量无显著差异（P>0.05）。

表 5 饲粮添加 APOS 对断奶大鼠盲肠食糜中菌群结构的影响

Table 5 The effect of dietary APOS supplementation on the microbial community structure in the cecal digesta of weaned rats (n=12) lg（CFU/g）

项目 Items	对照组 Control group	APOS 组 APOS group
乳酸菌 *Lactobacillus*	5.47±0.01^{b}	5.94±0.02^{a}
双歧杆菌 *Bifidobacterium*	3.23±0.01^{b}	3.58±0.01^{a}
大肠杆菌 *Escherichia coli*	8.51±0.03^{a}	7.65±0.01^{b}
总菌 Total bacteria	11.90±0.01	11.92±0.03

3 讨 论

近年大量的研究表明，功能性寡糖具有改善动物抗氧化能力、肠道健康等方面的功能[5,12-13]，因而在饲粮中添加功能性寡糖（如甘露寡糖、壳寡糖、果寡糖等）可显著提高畜禽和水生动物的生长性能[4,14-15]。前期预试验发现，饲粮添加不同水平（200~1 600 mg/kg）APOS 可不同程度提高断奶大鼠的生长性能，且以 800 mg/kg 添加水平效果最佳（数据未发表）。本研究也得到了类似的结果，即在以断奶大鼠为对象时，饲粮中添加 800 mg/kg APOS 也可提高大鼠的 ADFI 和 ADG，并显著降低其 F/G，表明 APOS 促进了大鼠的生长。那么，可以推测，饲粮添加 APOS 可能改善了大鼠的抗氧化能力和/或肠道健康。

而本研究的结果表明，断奶大鼠饲粮添加 800 mg/kg 的 APOS 可显著提高血清 T-AOC，显著降低血清中 MDA 含量，这与前人研究其他来源的果胶寡糖得到的结果类似[7,9]。机体自由基的产生和抗氧化能力的动态平衡与动物健康密切相关。T-AOC 是机体拮抗氧自由基的主要体系，它可清除机体产生的过多自由基，进而维持机体的正常代谢和功能；且近年的研究表明，T-AOC 反映了机体抗氧化系统对外来刺激的代偿能力和机体自由基代谢状态[16]。MDA 是体内多不饱和脂肪酸及其酯过氧化后的终产物，其是机体脂质过氧化和氧化还原状态的重要判定指标[17-18]。因此，可以推断，饲粮中添加 APOS 可通过提高机体抗氧化能力，减少机体产生的过量自由基和脂质过氧化产物，进而改善大鼠的健康。

肠道黏膜形态结构的完整性是评价肠道功能的重要指标。一方面，肠道黏膜形态结构是肠道上皮屏障功能的重要组成部分；另一方面，肠道黏膜绒毛高度和隐窝深度及其比值也可在一定程度上反映机体消化吸收能力[19-20]。而本研究中，饲粮添加 APOS 未显著影响断奶大鼠肠道黏膜膜绒毛高度和隐窝深度，但显著提高了绒毛高度/隐窝深度值。这些结果表明，饲粮中添加 APOS 可在一定程度上改善肠道黏膜的结构和完整性，进而有利于肠道功能的发挥。

前人的研究表明，POS 可显著改善人和动物肠道内的微生物组成[8]，这与本研究的结果类似，即饲粮中添加 APOS 显著提高了盲肠食糜中有益菌群的数量，降低了有害菌群的数量。而肠道微生态环境是维持肠道屏障功能的重要组成部分，并与人类和动物健康密切相关[21]。那么，也可以表明，饲粮中 APOS 的添加改善了断奶大鼠的生长性能与其改善了肠道菌群密切相关。

4 结　论

饲粮中添加 800 mg/kg 的 APOS 可显著改善断奶大鼠的生长性能，而这与其可改善大鼠血清抗氧化能力、肠道黏膜形态和菌群结构有关。本研究为果胶寡糖在临床和养猪生产上的应用提供了试验基础。作为功能性寡糖的一种，APOS 还可能调节机体诸多功能，如免疫功能、营养物质代谢等，这些功能均有利于动物生长。因此，对于这些方面也有待于进一步研究。

参考文献：

[1] 许青松,魏鹏,窦江丽,等.壳寡糖抑制肝癌细胞 SMMC-7721 的增殖及其机制探讨[J].天然产物研究与开发,2009,21(1):152–154.

[2] LI T P,LI S H,DU L J,et al.Effects of haw pectic oligosaccharide on lipid metabolism and oxidative stress in experimental hyperlipidemia mice induced by high-fat diet[J].Food Chemistry,2010,121(4):1010–1013.

[3] 肖定福,唐志如,印遇龙,等.壳聚糖对大肠杆菌攻毒仔猪生长性能和免疫力的影响[J].动物营养学报,2011,23(10):1783–1789.

[4] YAN L,KIM I H.Evaluation of dietary supplementation of delta-aminolevulinic acid and chitooligosaccharide on growth performance,nutrient digestibility,blood characteristics,and fecal microbial shedding in weaned pigs[J].Animal Feed Science and Technology,2011,169(3/4):275–280.

[5] 杨雪芬,熊光源,周桂莲,等.乳源性寡糖对仔猪肠道健康的影响及母猪乳腺合成寡糖的生

化机制[J].动物营养学报,2012,24(6):991–1000.

[6] 孙丽娜.寡聚半乳糖醛酸的酶解制备及其铜螯合物对小鼠生长特性的影响[D].硕士学位论文.北京:中国农业科学院,2007.

[7] LI T P,ZHU R G,DONG Y P,et al.Effects of pectin pentaoligosaccharide from Hawthorn (*Crataegus pinnatifida* Bunge.var.Major) on the activity and mRNA Levels of enzymes involved in fatty acid oxidation in the liver of mice fed a high-fat diet[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2013,61(31):7599–7605.

[8] LEIJDEKKERS A G M,AGUIRRE M,VENEMA K,et al.*In vitro* fermentability of sugar beet pulp derived oligosaccharides using human and pig fecal inocula[J].Journal of Agricultural and Food Chemistry,2014,62(5):1079–1087.

[9] LI T P,LIU Y H,DONG Y P,et al.Anti-fat deposition and antioxidant effects of haw pectic oligosaccharide in the liver of high-fat-fed mice[J].CyTA-Journal of Food,2014,12(1):27–31.

[10] MAO X B,LIU M H,TANG J,et al.Dietary leucine supplementation improves the mucin production in the jejunal mucosa of the weaned pigs challenged by porcine rotavirus[J].PLoS One,2015,10(9):e0137380.

[11] MAO X B,GU C S,HU H Y,et al.Dietary *Lactobacillus rhamnosus* GG supplementation improves the mucosal barrier function in the intestine of weaned piglets challenged by porcine rotavirus[J].PLoS One,2016,11(1):e0146312.

[12] 邵良平,周伦江,李国平,等.口服甘露寡糖(MOS)对哺乳仔猪免疫功能和血液 GSH-Px、SOD 的影响[J].中国兽医学报,2000,20(3):257–260.

[13] 胡彩虹,王友明.果寡糖对肥育猪生长及肠道菌群等的影响[J].无锡轻工大学学报,2001,20(6):568–572.

[14] 陈晶,薛占伟,蒋勤燕.甘露寡糖的生物学功能及对仔猪使用效果影响的因素[J].养殖技术顾问,2012(3):243–245.

[15] 马秋刚,胥传来,陈旭东,等.果寡糖饲料添加剂对断奶仔猪生产性能的影响[J].中国畜牧杂志,2004,40(10):53–55.

[16] 吕美.氧化应激对仔猪色氨酸代谢和需求特点的影响及机制研究[D].博士学位论文.雅安:四川农业大学,2009.

[17] JAIN S K.The accumulation of malonyldialdehyde,a product of fatty acid peroxidation,can

disturb aminophospholipid organization in the membrane bilayer of human erythrocytes[J].The Journal of Biological Chemistry,1984,259(6):3391–3394.

[18] MAO X B,LV M,YU B,et al.The effect of dietary tryptophan levels on oxidative stress of liver induced by diquat in weaned piglets[J].Journal of Animal Science and Biotechnology,2014,5(1):49.

[19] CHEN H,MAO X B,HE J,et al.Dietary fibre affects intestinal mucosal barrier function and regulates intestinal bacteria in weaning piglets[J].British Journal of Nutrition,2013,110(10):1837–1848.

[20] MAO X B,ZENG X F,QIAO S Y,et al.Specific roles of threonine in intestinal mucosal integrity and barrier function[J].Frontiers in Bioscience (Elite Edition),2011,3:1192–1200.

[21] SEKIROV I,RUSSELL S L,ANTUNES L C,et al.Gut microbiota in health and disease[J].Physiological Reviews,2010,90(3):859–904.

Effect of Dietary Apple Pectic Oligosaccharide Supplementation on the Growth Performance, Antioxidant Capacity and Intestinal Health of Weaned Rats

MAO Xiangbing[1*] FENG Xiaohua[2] CHEN Daiwen[1] YU Bing[1] SHI Bo[3] CHEN Hao[1] HE Jun[1] YU Jie[1] LUO Junqiu[1]

(1. *Institute of Animal Nutrition, Sichuan Agricultural University, Key Laboratory for Animal Disease-Resistance Nutrition of Ministry of Education, Chengdu* 611130, *China*; 2. *Hunan Institute of Animal and Veterinary Science, Changsha* 410131, *China*; 3. *Feed Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing* 100081, *China*)

Abstract: This experiment was conducted to determine the effect of dietary apple pectic oligosaccharide (APOS) supplementation on the growth performance, antioxidant capacity and intestinal health of weaned rats. Twenty-four healthy weaned Wistar rats, based on the initial body weight, were assigned randomly to 1 of 2 diets: the basal diet and the 800 mg/kg APOS supplemental diet. The experiment duration was 14 d. The results showed that dietary APOS supplementation significantly increased average daily gain and average daily feed intake (P<0.05), and significantly decreased feed to gain ratio (P<0.05) of weaned rats. Supplementation of APOS in diet also significantly enhanced the total antioxidant capacity (P<0.05), significantly reduced the malondialdehyde content (P<0.05) in the serum of weaned rats. In addition, dietary APOS supplementation could significantly increase the ratio of villus height to crypt depth of jejunum mucosa and the *Lactobacillus* and *Bifidobacterium* populations of cecal digesta (P<0.05), and significantly reduce the *Escherichia coli* population of cecal digesta (P<0.05) in weaned rats. These results suggest that supplementation of APOS in diets may increase the growth performance of weaned Wistar rats, which could be due to that APOS could improve the antioxidant capacity, jejunum mucosal morphology and intestinal flora structure of rats.

Key words: apple pectic oligosaccharide; weaned rats; growth performance; antioxidant capacity; intestinal health

*Author, MAO Xiangbing, associate professor, E-mail: acatmxb2003@163.com (责任编辑　田艳明)